

# 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动

陈聪聪<sup>1,2</sup>, 饶拉<sup>2</sup>, 黄金良<sup>1,2\*</sup>, 白敏冬<sup>2</sup>

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 厦门大学福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361102)

**摘要:** 选取厦漳泉三地市饮用水源地九龙江 20 条支流以及 4 个水库开展 2013 ~ 2014 年为期一年的逐月水质与生态调查与监测, 并借助 GIS、统计分析方法, 识别了氮磷营养盐和浮游植物藻类丰度和群落的时空变异性, 河流与水库氮磷营养盐限制的差异性以及其控制性的季节性变化特征。结果表明, 九龙江支流和水库的营养盐、藻类丰度和群落都分别展示出明显的时空变异性。支流和水库均呈现营养盐氮素浓度冬春季节较高, 夏秋季节较低; 营养盐磷素浓度大体与之相反。水库藻类丰度于夏季最高, 而支流藻类丰度呈现冬春季节较高, 夏秋季节较低的趋势。其中, 汀溪水库于秋冬春季节和夏季呈现硅藻、绿藻演替; 江东库区于冬春、夏秋季节呈现绿藻-隐藻、绿藻-蓝藻演替; 石兜-坂头水库以及支流均未出现季节演替现象, 优势藻分别为蓝藻、绿藻。RDA 排序图较好地显示了浮游植物藻类与环境因子之间的关系。水库叶绿素 a 与氮磷营养盐之间呈现显著相关性, 相关关系较强, 并且其相关关系在冬春季节呈现营养盐磷的限制性, 夏秋季节呈现营养盐氮的限制性。相比于水库, 支流叶绿素 a 与营养盐之间只有夏秋季节呈现显著相关性, 且相关关系较弱。

**关键词:** 水体富营养化; 沿海河流-水库系统; 营养盐限制; 季节性变化; 藻类

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3238-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.015

## Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China

CHEN Cong-cong<sup>1,2</sup>, RAO La<sup>2</sup>, HUANG Jin-liang<sup>1,2\*</sup>, BAI Min-dong<sup>2</sup>

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** A comprehensive analysis was conducted using a dataset obtained from October in 2013 to October in 2014 monitoring in 20 headwater streams of Jiulong River and four reservoirs, situated in such a coastal river-reservoir system in Southeast China suffering from intensive anthropogenic disturbance. In-situ monitoring, GIS and statistical analysis were coupled in this study to identify the spatiotemporal variations of nutrients & phytoplankton abundance and community structure, the differentiation of nitrogen & phosphorus limitation of phytoplankton growth, and the seasonal variations in nutrient limitation of phytoplankton growth. The results showed that there were obvious spatiotemporal variations in terms of nutrients & phytoplankton abundance and community structure in the 20 headwater streams and four reservoirs. The concentration of nitrogen was higher in winter and spring whereas lower in summer and autumn for both 20 headwater streams and four reservoirs. However, the concentration of phosphorus showed an opposite trend. The phytoplankton's abundance was the highest in summer for four reservoirs while it was higher in winter and spring, lower in summer and autumn in the 20 headwater streams. Meanwhile, the main trend in the succession of phytoplankton was from *Bacillariophyta* in autumn, winter and spring to *Chlorophyta* in summer in Tingxi reservoir, from *Chlorophyta*-*Cryptophyta* in winter and spring to *Chlorophyta*-*Cyanophyta* in summer and autumn in Jiangdong reservoir. No obvious trend exhibited in phytoplankton succession in Shidou-Bantou reservoir and 20 headwater streams. The Redundancy analysis (RDA) ordination plots well displayed the phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors. Besides, according to linear regression analysis there was a closer correlation between chlorophyll-a and nutrients in four reservoirs than in 20 headwater streams. In four reservoirs, N limitation was preliminarily observed in autumn whereas P limitation exhibited in winter.

**Key words:** eutrophication; coastal river-reservoir system; nutrient limitation; seasonal variation; phytoplankton

水体富营养化威胁着区域及至全球范围内的饮用水安全, 其发展趋势至今未呈缓和迹象<sup>[1~3]</sup>。在水生态系统中, 由于氮磷营养盐增加引起的水体富营养化<sup>[4]</sup>, 导致藻类暴发, 使河流、湖泊和水库等水源地水质退化, 严重削弱了其生态系统服务与功能。

我国正处于城市化快速发展阶段, 但工业废水与生活污水的处理率相比发达国家而言仍然较低, 加之非点源污染的影响, 河流、湖泊、水库等作为

接纳水体不断承接高浓度营养盐污染物的排放, 水质持续下降<sup>[5]</sup>。近 20 年来, 我国水电梯级开发剧烈, 河流湖库化现象十分严峻, 伴随着河流营养盐输

收稿日期: 2014-12-21; 修订日期: 2015-04-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC06B01); 国家自然科学基金项目(41471154)

作者简介: 陈聪聪(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境管理, E-mail: cccxmdx@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: jlhuang@xmu.edu.cn

入的增加, 水体富营养化由大型湖泊扩展到河流库区, 呈现由点到面不断蔓延趋势<sup>[6, 7]</sup>。针对现状, 国内外开展了大量的相关研究, 但国内有关浮游植物藻类与营养盐的相关性变化规律研究主要集中于太湖、巢湖等大型湖泊<sup>[8-10]</sup>, 例如, 王睿喆等<sup>[11]</sup>对太湖梅梁湾的研究发现春季浮游植物的生长主要受磷限制, 温胜芳等<sup>[12]</sup>针对巢湖日益严重的水体富营养化现象进行了水体表层沉积物磷的空间分布差异性研究; 针对河流的相关研究相对较少; 且氮或磷哪种营养元素作为浮游植物藻类生长的限制因子, 以及河流与湖库之间影响浮游植物藻类生长的水环境因子的差异性, 目前尚无定论, 尽管当前一些研究已清楚表明, 营养盐氮、磷或者氮磷的共同作用可以控制藻类的生长<sup>[13, 14]</sup>、生物量<sup>[15, 16]</sup>以及种群结构<sup>[17-19]</sup>。显然, 识别和理解不同受纳水体的藻类生长营养盐限制变化规律以及富营养化驱动力的潜在机制尤为紧迫。

本研究选取福建省厦漳泉三地市饮用水源地九龙江的 20 条支流以及 4 个水库(汀溪水库、石兜水库、坂头水库、江东库区)作为研究对象。作为漳州、龙岩、厦门三地市超过 1 000 万人的饮用水与工农业用水源, 关乎区域饮用水安全, 生态意义重大。通过

研究所在区域的水质以及浮游植物藻类的时空动态变化特征, 河流与水库藻类生长营养盐限制变化规律的差异性, 以期为其水质监测与控制提供依据。

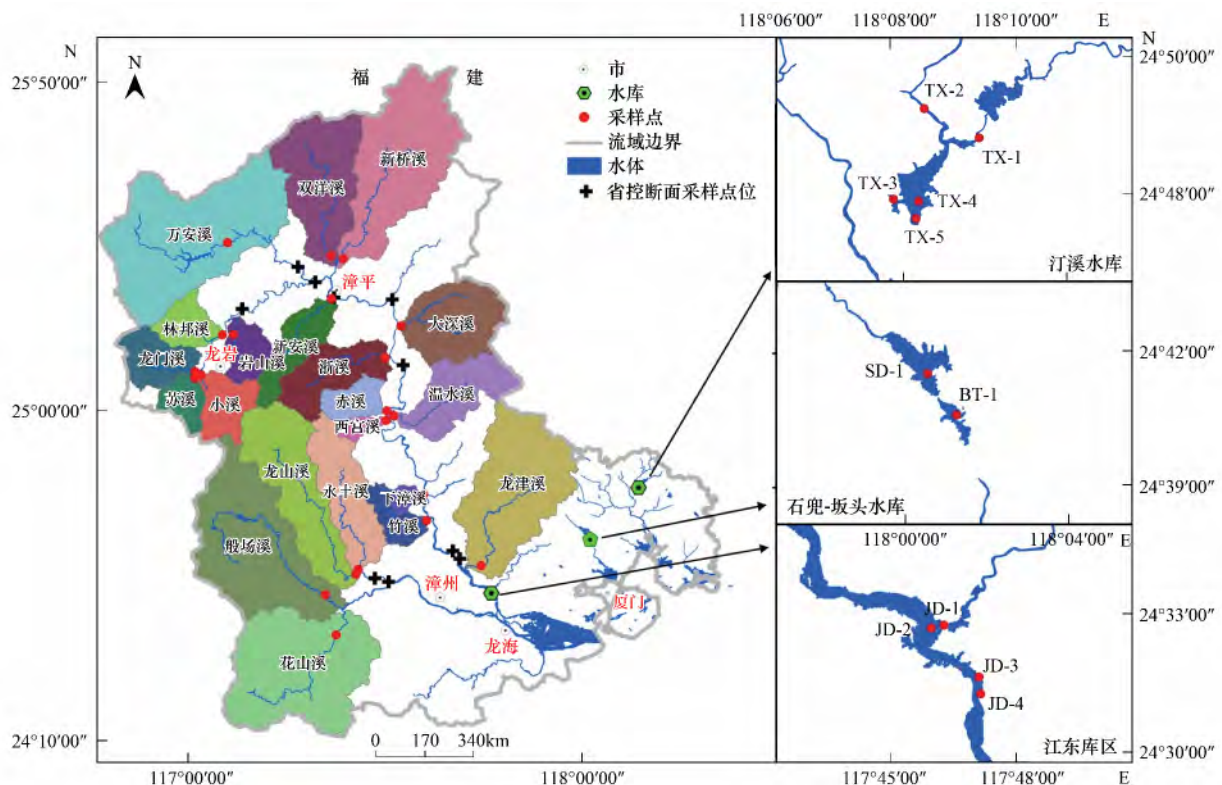
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究区域包括九龙江 20 条支流以及江东库区、汀溪水库、石兜-坂头水库这 4 个水库(图 1)。其中, 九龙江位于东经 116°46′55″~118°02′17″, 北纬 24°23′53″~25°53′38″, 是福建省第二大河, 由北溪、西溪、南溪组成, 属于亚热带海洋性季风气候区, 流域面积  $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 年平均径流量达  $8.23 \times 10^9 \text{ m}^3$ ; 江东库区位于九龙江北溪的下游, 提供厦门 80% 的饮用水; 汀溪水库、石兜-坂头水库同时是厦门市岛外地区主要的饮用水源地, 担负着向同安、翔安、集美城镇居民及工农业生产输送原水的重任。本研究考虑到能全面反映九龙江、水库的水质和浮游植物藻类的现状, 以及采样的现实性, 选取了九龙江支流 20 个采样点以及 4 个水库的 11 个采样点, 具体的地理位置以及采样点位如图 1。

### 1.2 采样和化学分析

本研究从 2013 年 8 月起至 2014 年 9 月, 平均



TX 代表汀溪, SD 代表石兜, BT 代表坂头, JD 代表江东

图 1 研究区域采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites in the study area

每月于九龙江支流 20 个点位以及水库 11 个点位进行水质调查采样,每一个点位分别用聚乙烯瓶装 250 mL 和 500 mL 水样用于营养盐测定和藻类鉴定.采样结束后,测定营养盐的水样需立即放入 4℃ 冷藏箱保存,带回实验室之后 24 h 之内完成测定;鉴定藻类的水样需要滴加 5 mL 左右的鲁格试剂进行样品固定.九龙江支流水样测定的水质参数包括:总氮(TN)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、总磷(TP)、活性磷(SRP)、氯化物( $\text{Cl}^-$ )、叶绿素 a (Chla)、浊度;除此之外,现场采用多参数水质分析仪(Hach Hydrolab DS5X, USA)测定温度、pH、溶解氧(DO),采用透明度盘测定透明度(SD).所有水质参数测定均严格参照文献[20]进行,藻类鉴定参照文献[21-22]进行.

### 1.3 数据处理和统计分析

随着统计学的发展,多元统计回归、梯度分析理论如除去势对应分析(detrended canonical correspondence analysis, DCA)、冗余分析(redundancy analysis, RDA)等方法日渐成熟<sup>[23]</sup>.其中 DCA 是一种非约束性单峰排序方法,其目的是寻

求反应物种和环境之间关系以及在某一环境梯度上的种间关系的最合适模型.本研究中,利用 DCA 对浮游植物藻类进行除趋势分析,探求反应生物群落因子与水质影响因子之间的最合适模型. RDA 是一种直接梯度分析方法,能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系<sup>[24-25]</sup>.本研究中利用冗余分析,解释浮游植物群落与水质影响因子之间的关系.

一元线性回归是处理一个随机变量  $Y$  与一个普通变量  $X$  之间的线性回归关系的方法<sup>[26]</sup>.本研究中利用一元线性回归分析叶绿素 a 与氮磷营养盐之间的相关性,识别影响浮游植物藻类生长的主要限制因子.

本研究主要利用到的数据分析软件为 SPSS 16.0 和 Canoco 4.5.

## 2 结果与分析

### 2.1 营养盐水质时空动态变化特征

通过对九龙江支流以及水库一年的水质监测数据进行整理分析,将其分为春夏秋冬这 4 个季节,具体的营养盐水质季节性变化分别如图 2 和图 3.

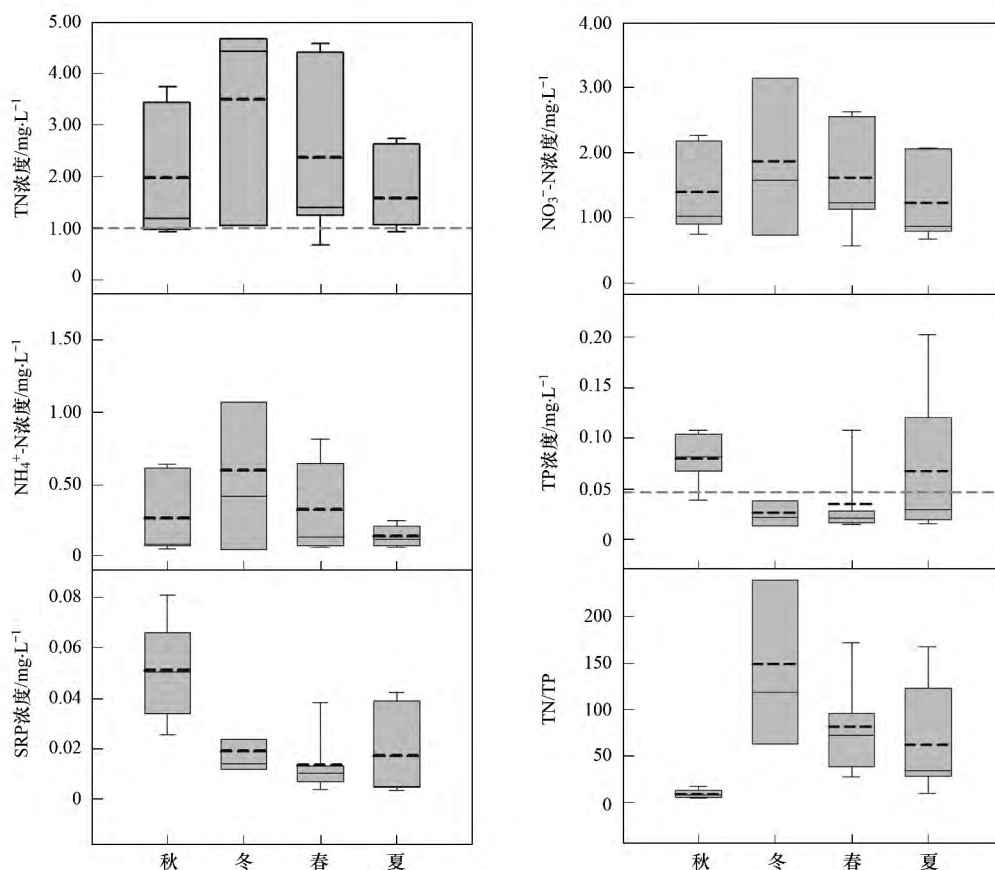


图 2 水库营养盐水质指标季节性变化

Fig. 2 Seasonal variation of the nutrient in reservoirs

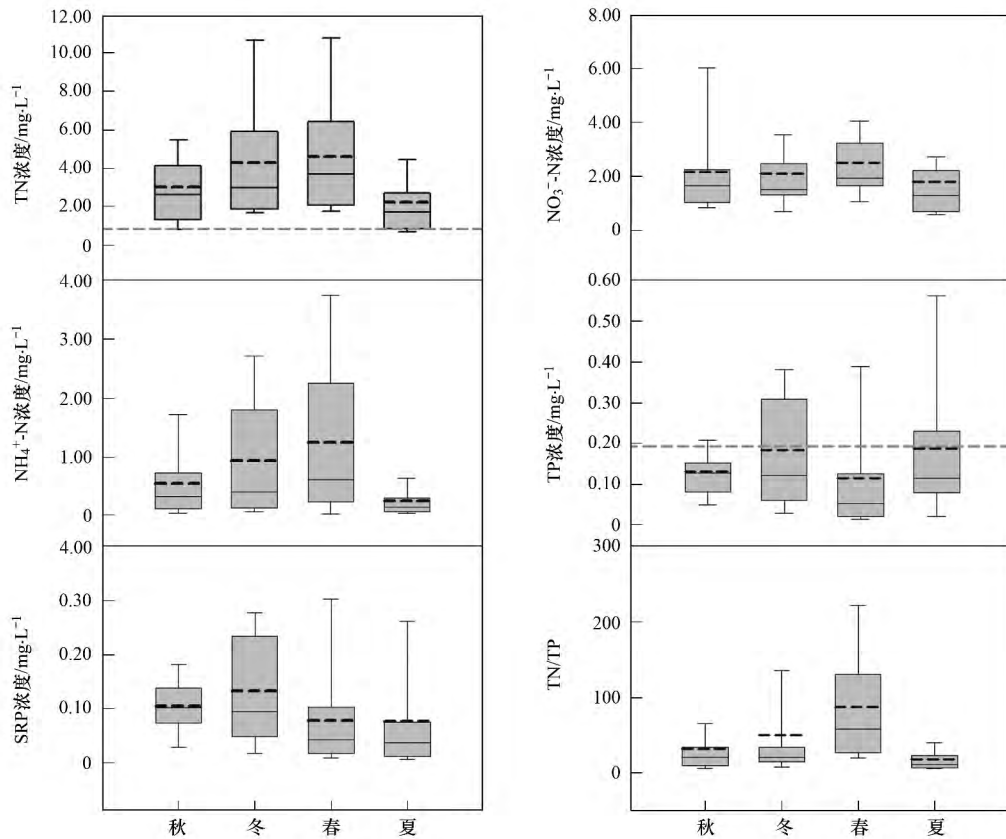


图3 九龙江营养盐水质指标季节性变化

Fig. 3 Seasonal variation of the nutrient in 20 headwater streams

如图2和图3所示,总体上来看,水库和支流营养盐水质指标TN四季平均值均大于地表水环境质量标准三类水限值 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,支流TP四季平均值均大于相应限值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而水库TP冬春季小于相应限值 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,夏秋季节大于相应限值 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水库营养盐指标TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的平均值均呈现出夏秋季节 $>$ 冬春季节,而TP、SRP的平均值则恰恰相反,呈现出规律冬春季节 $>$ 夏秋季节,与之相适应,TN/TP的比值平均值呈现冬春季节 $>$ 夏秋季节,比值平均值在冬春夏季均大于7,秋季则小于7。九龙江营养盐指标TN、

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN/TP平均值的变化规律与水库类似,呈现夏秋季节 $>$ 冬春季节,但TN/TP比值均大于7,TP、SRP的变化规律则与水库不尽相同,分别呈现出夏季与秋季最高。

## 2.2 浮游植物群落的时空动态变化特征

通过对水库和支流采集水样进行藻类鉴定,本研究共鉴别出包括蓝藻、绿藻、硅藻、甲藻、裸藻、隐藻、金藻这7个门在内的浮游植物藻类,水库和支流藻类丰度的季节性变化特征如图4,藻类群落演替特征见图5和图6。

如图4所示,水库的藻类丰度中位值在秋季、

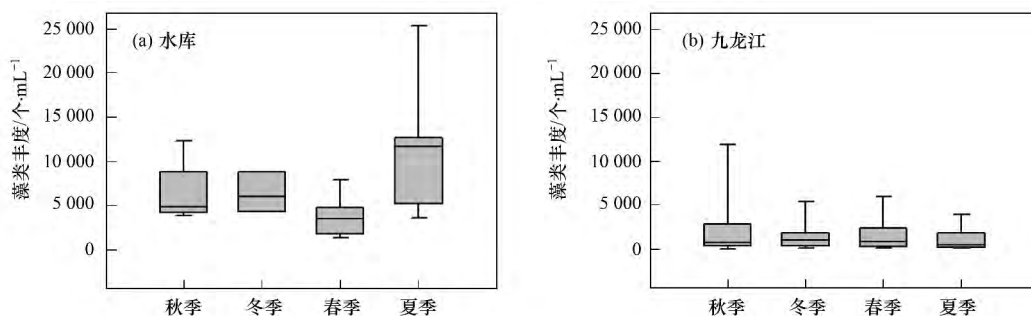


图4 藻类丰度季节性变化特征

Fig. 4 Seasonal variation of the phytoplankton community in reservoirs and Jiulong River

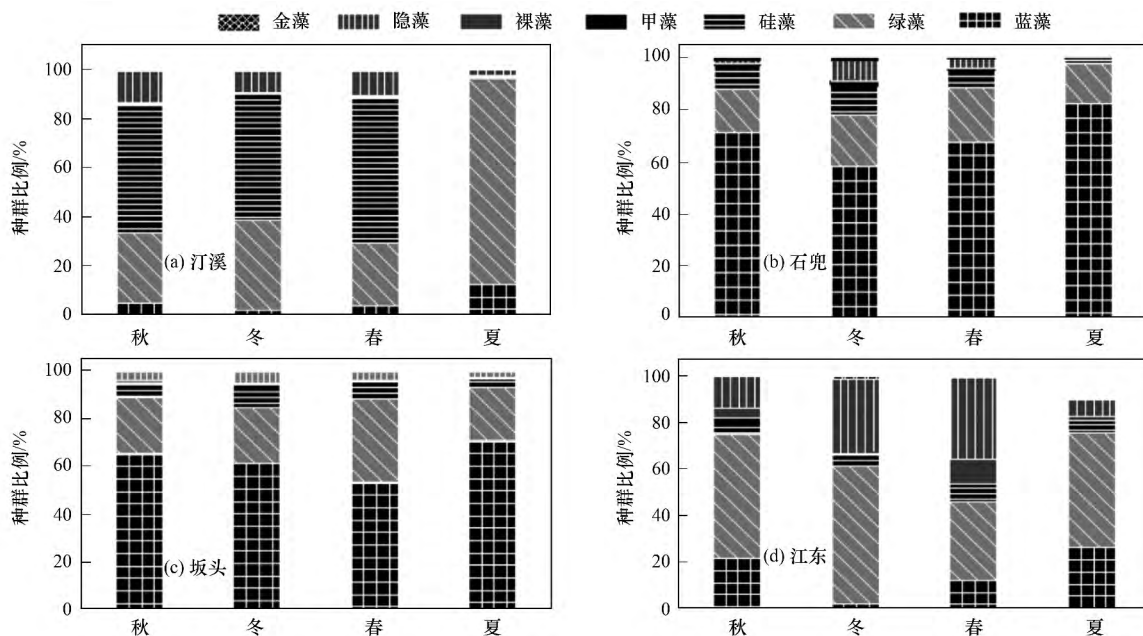


图 5 水库藻类群落百分比

Fig. 5 Percentage of the phytoplankton community in reservoir

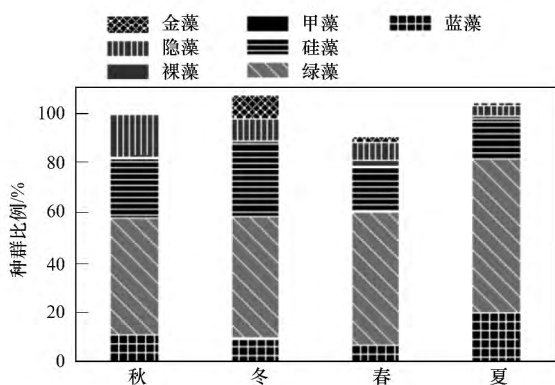


图 6 九龙江支流藻类群落百分比

Fig. 6 Percentage of the phytoplankton community in Jiulong River

冬季、春季、夏季分别为 4 802、6 018、3 525 和 11 625 个·mL<sup>-1</sup>, 夏季藻类丰度最高; 支流的藻类丰度中位值在秋季、冬季、春季、夏季分别为 710、970、66 和 492 个·mL<sup>-1</sup>, 冬春季节高于夏秋季节。总体而言, 水库的藻类丰度远远高于支流。

图 5、图 6 分别为 4 个水库以及支流的藻类群落组成情况, 其中汀溪水库在秋季、冬季和春季的优势藻均为硅藻, 种群百分比均大于 50%, 在夏季的优势藻为绿藻, 种群百分比占 83% 左右, 随季节变化呈现硅藻与绿藻演替现象; 石兜-坂头水库的群落组成相对来说较为稳定, 无藻类季节演替现象, 石兜水库的优势藻为蓝藻, 四季种群百分比均占 70% 以上, 坂头水库的优势藻为蓝藻, 绿藻次之, 其

蓝藻的百分比占 60% 以上, 绿藻占 20% 以上; 江东水库在夏秋季节的优势藻为绿藻和蓝藻, 冬春季的优势藻为绿藻和隐藻; 九龙江支流的藻类群落组成相对来说也比较稳定, 无藻类季节演替现象, 以绿藻为优势藻种, 四季种群百分比均在 40% 以上, 硅藻次之。

### 2.3 藻类生物因子与环境因子的关系

分别对水库和支流浮游植物群落种类进行 DCA 分析, 具体结果如表 1 所示, 根据各特征值分布可知, 水库浮游植物种类 DCA 分析 4 个排序轴中梯度长度最大的第一轴值为 0.287, 支流为 0.957, 均小于 3, 故在物种响应环境梯度模型上选择线性模型比较合适, 本研究中采用 RDA 分析来解释浮游植物种类与水质因子的相关关系。图 7 给出了浮游植物藻类和环境因子 RDA 排序图。

如图 7 所示, 不同的浮游植物种类对环境因子的响应程度亦呈现不同的状态。总体上看, 水库经藻类鉴定的 7 个门中, 金藻、裸藻和隐藻门与营养盐的相关性显示较好, 而作为石兜-坂头水库的优势藻种蓝藻, 其营养盐的相关性并不明显, 但是与温度、DO、pH 等指标相关性显示较好, 作为汀溪水库的优势藻种硅藻、绿藻, 其与营养盐的相关性较差, 直接与浮游植物生物量相对应的指标叶绿素 a 则与营养盐的相关性较明显 [图 7(a)]。由图 7(b) 可见, 总体而言, 与水库不同, 支流经藻类鉴定的 7 个门中, 金藻、硅藻、裸藻、蓝藻门以及包括在水质监



测期间处于优势藻种的绿藻都与营养盐的相关性较好,而甲藻和隐藻则与营养盐的相关性较差,其中,受降雨径流影响浊度比较大的河流地区,营养盐以及浮游植物藻类均与之相关性较差。

表 1 水库及支流浮游植物种类 DCA 分析轴特征值

轴	水库			九龙江		
	特征值	梯度长度	物种数据累积百分比变化率/%	特征值	梯度长度	物种数据累积百分比变化率/%
轴 1	0.057	0.996	55	0.014	0.287	62
轴 2	0.016	0.572	70	0.003	0.196	74
轴 3	0.004	0.390	74	0.001	0.200	77
轴 4	0.002	0.544	75	0.000	0.214	77

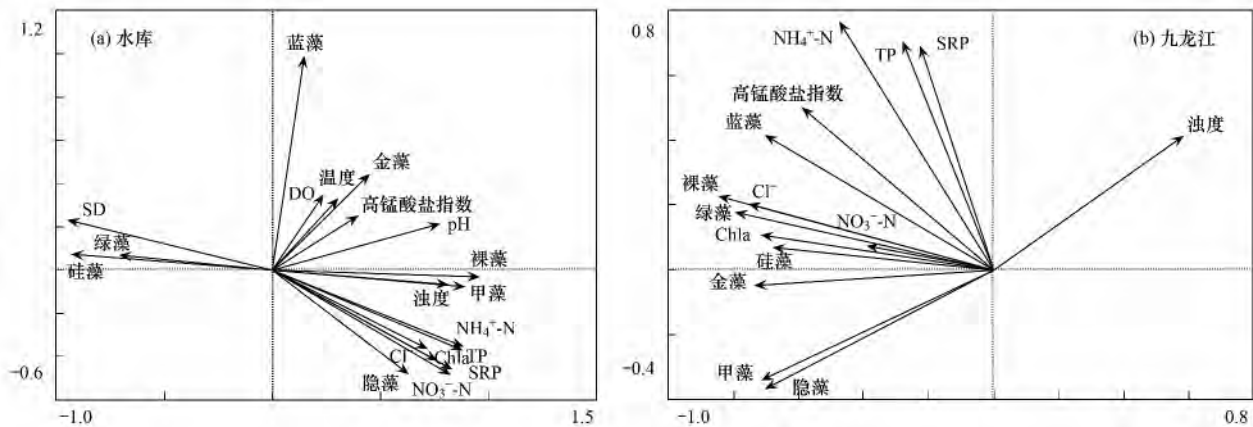


图 7 浮游植物藻类和环境因子 RDA 排序

Fig. 7 Ordination diagram of dominant water quality factors and dominant phytoplankton

2.4 叶绿素 a 与氮磷营养盐的关系

在富营养化水体中,叶绿素 a 浓度可以很好地反映浮游植物生物量<sup>[27-28]</sup>,现有的富营养化评价方法也是以叶绿素 a 浓度的等级划分为基础并考虑了营养盐浓度等因子的影响.在冗余分析中,叶绿素 a 对营养盐的响应亦比较好,并且叶绿素 a 的测定相对浮游植物较简单,故本研究采用分析叶绿素 a 与氮磷营养盐的关系揭示东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制变化规律,其具体的回归分析如图 8、图 9.

整体上看,水库叶绿素 a 与氮磷营养盐的相关关系较好(图 8);从 P 值来看,水库叶绿素 a 与 TN、TP 在夏秋季节均成显著相关性,但是在冬春季节,叶绿素 a 只与 TP 有显著相关性;与显著性相应,回归分析的  $R^2$  值分别为  $R^2_{(冬季,TP)} = 0.4683$ ,  $R^2_{(春季,TP)} = 0.4281$ ,夏季  $R^2_{(夏季,TN)} = 0.8833 > R^2_{(夏季,TP)} = 0.7900$ ,秋季与夏季类似,秋季  $R^2_{(秋季,TN)} = 0.7771 > R^2_{(秋季,TP)} = 0.2775$ .由图 9 可知,整体上看,支流叶绿素 a 与氮磷营养盐的相关关系较弱,从 P 值来看,支流与水库明显不同,叶绿素 a 仅仅在

冬春季节分别与 TN、TP 有显著相关性,夏秋季节则没有显著相关性;同时与显著性相应,  $R^2_{(冬季,TP)} = 0.2734$ ,  $R^2_{(春季,TN)} = 0.2460$ .

3 讨论

3.1 营养盐水质时空动态变化特征

水库以及支流 N 均为夏秋季节较低,冬春较高;P 大体呈现相反趋势(图 2、图 3),这与很多研究结果类似,例如 Xu 等<sup>[29]</sup>在 2010 年对中国太湖的研究,Duan 等<sup>[30]</sup>在 2012 年对 Chesapeake Bay 流域的 Patapsco 河进行的研究等.大多数水化学指标的季节性变化是由气候以及生物因子驱动的<sup>[30-31]</sup>,夏季温度较高,N 因为高的反硝化作用,生物固氮作用,以及较大的降雨径流量稀释作用,通常情况下浓度很低;同时,本研究区域范围水体质量条件很大程度上是由人为控制产生的,例如生活污水、工业废水排放、农业氮素输入等<sup>[32]</sup>,冬春季节枯水期受其影响较大,浮游植物藻类由于温度较低活性亦较低,导致冬春季节 N 浓度偏高.P 在夏秋季,因为雨季暴雨冲刷携带大量的颗粒态磷的输入,加之夏季气温高,磷从底泥释放等因素<sup>[33]</sup>,浓度较高,而在冬春

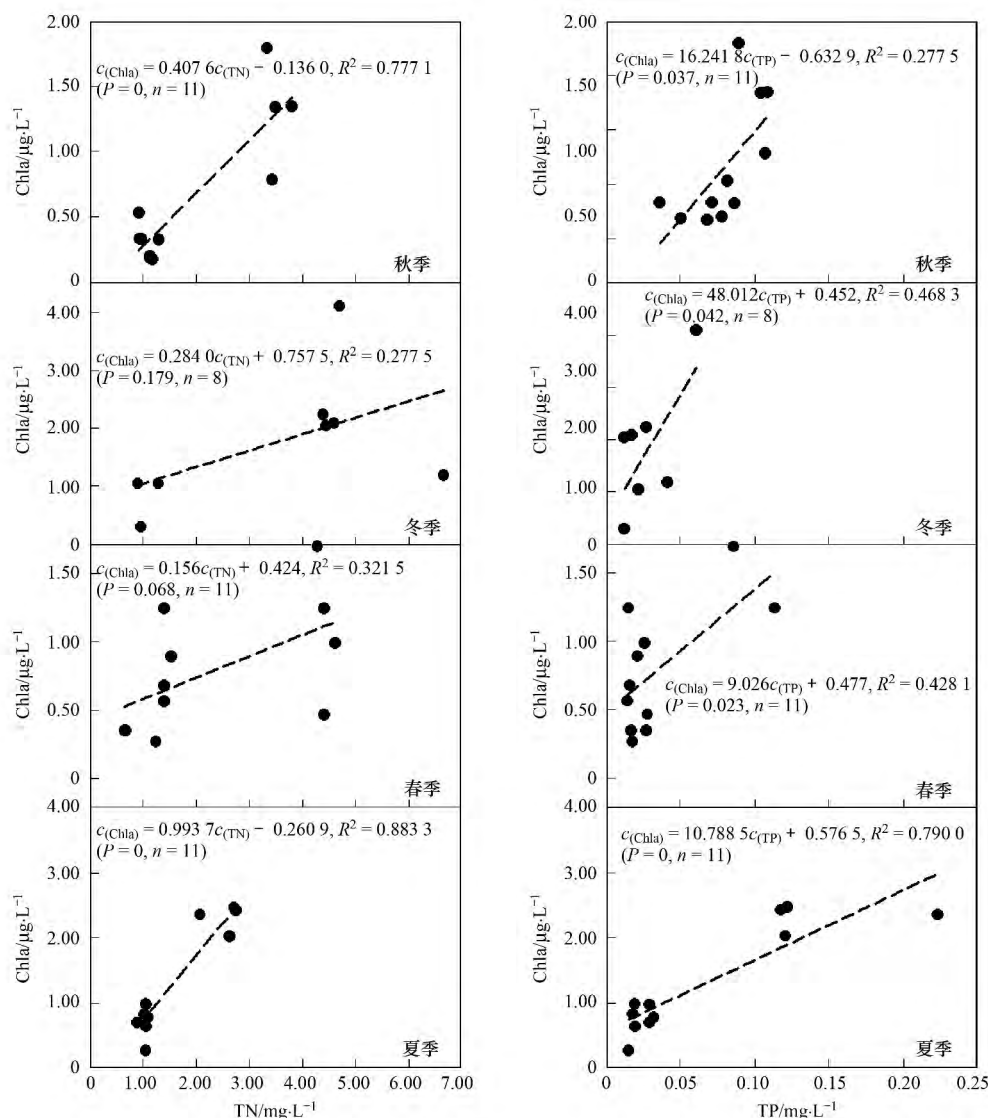


图8 水库叶绿素 a 与氮磷营养盐的回归分析

Fig. 8 Regression analysis between Chl-a and nutrient in reservoir

季节降水较少,磷的非点源来源较少而且由于气温较低,内源释放也相对较少,导致这个季节磷浓度相对较低. TN/TP 比值也因此呈现出夏秋季节与冬春季节的规律性变化.

### 3.2 浮游植物藻类的时空动态变化特征

水库因为水体生境相对较为稳定,所以整体上看,藻类丰度大于支流. 水库藻类丰度在夏季亦相应较高,因为夏季温度较高,可以为微生物分解有机物提供能量,最终为藻类生长提供更多的营养物质<sup>[34, 35]</sup>. 支流河流总体藻类丰度冬春季节高于夏秋季节,这与国内一些研究<sup>[36, 37]</sup>相类似,夏秋季节是河流丰水期,降雨径流导致水量增加,水体生境相对不稳定,藻类生长不够旺盛,Power 等认为<sup>[38]</sup>,冬春季节较为寒冷,河流无脊椎动物的减少使得藻类捕

食压力减小也是导致藻类大量生长的原因之一.

水库和支流浮游植物藻类群落呈现明显的时空动态变化特征,不同的地区呈现不同的藻类群落结构,并且在汀溪水库以及江东库区出现明显的藻类季节演替现象(图5). 其中,江东水库的藻类季节演替现象大体与国内相关研究相似<sup>[39, 40]</sup>. 作为汀溪水库冬、春、秋季的优势藻,硅藻因为对 pH、溶解性有机物以及营养盐等多种环境因子反应比较敏感,因此在很多地区已经用于监测指示生物<sup>[41~44]</sup>. 作为石兜-坂头水库优势藻种以及江东水库夏秋季节演替为优势藻的蓝藻对高温的耐受性要好于其他藻类<sup>[45]</sup>,通常在较为稳定的水体中出现,常见的水华蓝藻几乎都能够产生毒素<sup>[46]</sup>,会对人类和动物的健康和生命构成严重威胁<sup>[47]</sup>. 江东水库于冬春季

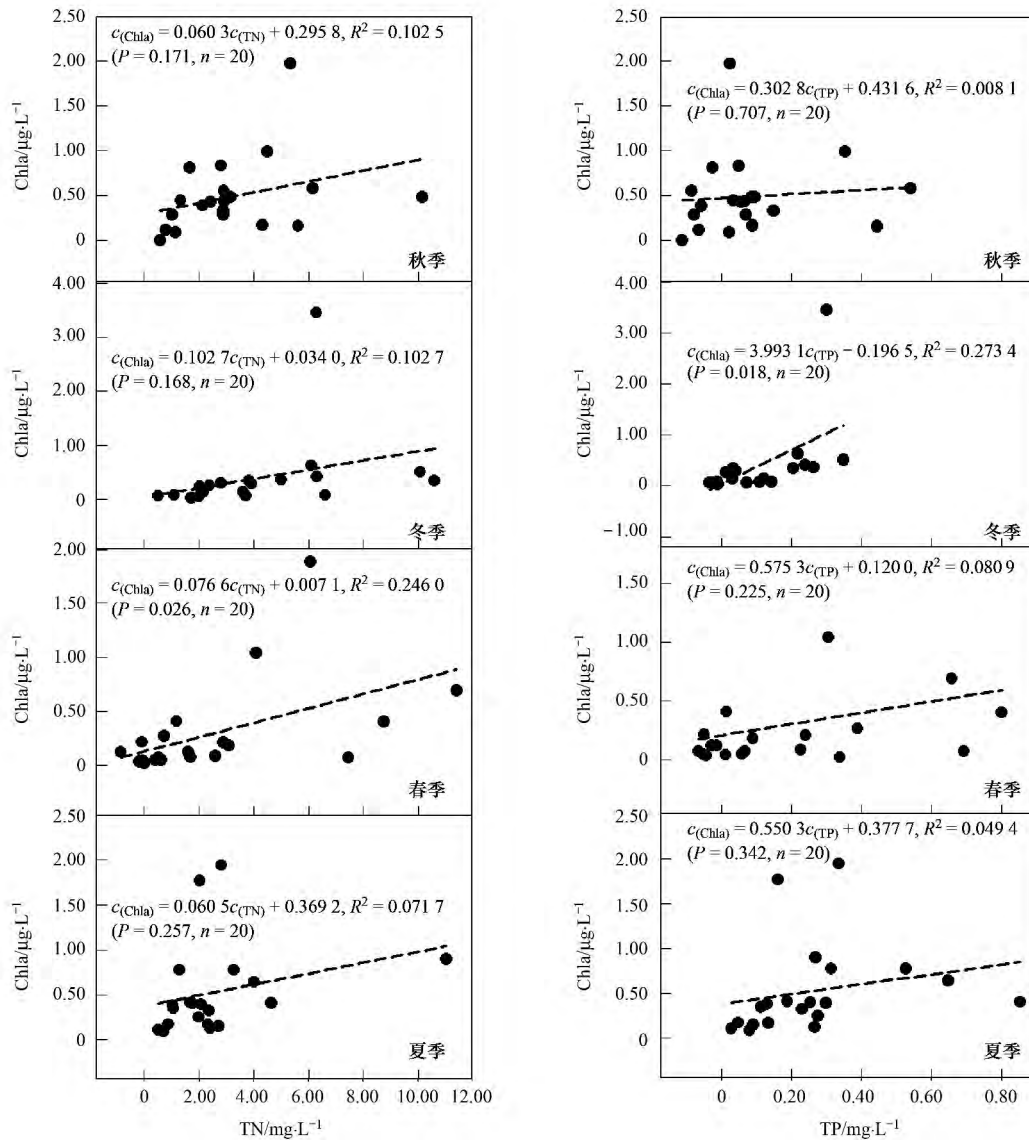


图9 支流叶绿素 a 与氮磷营养盐的回归分析

Fig. 9 Regression analysis between Chl-*a* and nutrient in Jiulong River

节演替为优势藻的隐藻,则主要是在水流量较低、水温较低的环境中出现。作为支流河流四季以及隶属于九龙江的江东库区秋冬夏三季的优势藻,绿藻相对于其他藻种更易于在水流动性较大的环境下生存,其藻类丰度绿藻 > 硅藻 > 蓝藻 > 隐藻的顺序亦与有关研究相一致<sup>[48]</sup>。

### 3.3 河流-水库系统藻类与营养盐的关系

本研究基于 RDA 分析结果表明,叶绿素 *a* 对营养盐的响应比较好,考虑到在富营养化水体中,叶绿素 *a* 浓度可以很好地反映浮游植物生物量<sup>[27, 28]</sup>,现有的富营养化评价方法也是以叶绿素 *a* 浓度的等级划分为基础并考虑了营养盐浓度等因子的影响,并且叶绿素 *a* 的测定相对浮游植物较简单,故本研究采用分析叶绿素 *a* 与氮磷营养盐的关系揭示东南沿

海河流-水库系统藻类生长营养盐限制变化规律。

目前还没有确定的模型可以很好地解释叶绿素 *a* 与环境变量之间的关系<sup>[49]</sup>,根据本研究结果,总体上看,水库叶绿素 *a* 与营养盐之间的相关性明显要好于支流,湖库环境相对比较稳定,故其关系表现较好,但是在河流以及环境因素不太稳定的湖库地区,尤其是夏季,许多环境因子都可能会解释叶绿素 *a* 的变异性,例如温度、浊度、径流量、风力、沙石开采、水力停留时间等等。对于河流来讲,目前为止,营养盐与藻类其关系还并不是很清楚<sup>[50, 51]</sup>,有待进一步的调查。

本研究中,整体分析,水库不同藻类生长主要环境因素虽然不同,但是总体上表征生物量的叶绿素 *a* 与氮磷营养盐之间的相关关系季节性变化规律明



显,夏秋季节,水体 TN/TP 比值较低,叶绿素 a 与 TN 相关关系较好,初步分析,水体藻类生长的限制性营养盐为氮;冬春季节,水体 TN/TP 比值较高,叶绿素 a 与 TN 的相关关系较好,初步分析,水体藻类生长的限制性营养盐为磷。早在 1984 年,Hartig 等<sup>[52]</sup>在北美的伊利湖进行了营养盐限制性的季节性变异研究。White 等<sup>[53]</sup>在 1991 年发现赫罗范努瓦湖水体在冬天 P 是限制性因子,然而在夏季 N 是限制藻类生长的因子。

#### 4 结论

(1) 水库、支流营养盐 N 浓度总体上呈现夏秋季节较低,冬春季节较高的变化规律,营养盐 P 浓度的季节变化规律大体与之相反。

(2) 水库浮游植物藻类生物量夏季最高;支流浮游植物藻类生物量丰度冬春季节较高,夏秋季节较低。

(3) 水库与支流浮游植物藻类群落时空变异特征明显,汀溪水库的优势藻为硅藻,绿藻;石兜-坂头水库的优势藻为蓝藻,江东库区的优势藻为绿藻,蓝藻,隐藻,支流地区主要的优势藻为绿藻,硅藻次之。且汀溪水库出现秋、冬春季硅藻和冬季绿藻演替现象;江东库区于冬春,夏秋季节呈现绿藻-隐藻、绿藻-蓝藻演替现象。

(4) 水库叶绿素 a 与营养盐之间的相关性较支流强,且有季节性变化规律,初步分析,整体上浮游植物藻类夏秋季节为 N 限制,冬春季节为 P 限制。

#### 参考文献:

- [1] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [2] Vonlanthen P, Bittner D, Hudson A G, *et al.* Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations [J]. *Nature*, 2012, **482**(7385): 357-362.
- [3] Zhao Z H, Mi T F, Xia L L, *et al.* Understanding the patterns and mechanisms of urban water ecosystem degradation: phytoplankton community structure and water quality in the Qinhuai River, Nanjing City, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(7): 5003-5012.
- [4] Nixon S W. Eutrophication and the macroscope [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **629**(1): 5-19.
- [5] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature*, 2005, **435**(7046): 1179-1186.
- [6] Meybeck M, Chapman D V, Helmer R. Global fresh water quality, a first assessment [J]. Oxford: Blackwell, 1989. 195-217.
- [7] Chen J S. River water quality in china and principle of river water [M]. Beijing: Science Press, 2006. 68-69, 210-212.
- [8] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.
- [9] Qin B Q, Zhu G W, Gao G, *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu China: linkage to climatic variability and lake management [J]. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [10] Jiang Y J, He W, Liu W X, *et al.* The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **40**: 58-67.
- [11] 王睿喆,王沛芳,任凌霄,等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1301-1308.
- [12] 温胜芳,单保庆,张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2322-2329.
- [13] Elmgren R, Larsson U. Nitrogen and the Baltic Sea: managing nitrogen in relation to phosphorus [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 371-377.
- [14] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, **10**(2): 126-139.
- [15] Cloern J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **210**: 223-253.
- [16] Bledsoe E L, Philips E J, Jett C E, *et al.* The relationships among phytoplankton biomass, nutrient loading and hydrodynamics in an inner-shelf estuary [J]. *Ophelia*, 2004, **58**(1): 29-47.
- [17] Duarte C M, Agusti S, Agawin N S R. Response of a mediterranean phytoplankton community to increased nutrient inputs: A mesocosm experiment [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **195**: 61-70.
- [18] Smayda T J, Reynolds C S. Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms [J]. *Journal of Plankton Research*, 2001, **23**(5): 447-461.
- [19] Caron D A, Lim E L, Sanders R W, *et al.* Responses of bacterioplankton and phytoplankton to organic carbon and inorganic nutrient additions in contrasting oceanic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2000, **22**(2): 175-184.
- [20] 胡鸿钧. 中国淡水藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [21] 翁建中. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [22] 福建省环境监测中心站. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [23] Birks H J B, Frey D G, Deevey E S. Numerical tools in palaeolimnology-progress, potentialities and problems [J].

- Journal of Paleolimnology, 1998, **20**(4): 307-332.
- [24] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and CanoDraw for windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5) [R]. New York: Microcomputer Power, 2002.
- [25] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. Ecology, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [26] 邵崇斌. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [27] USEPA. Nutrient criteria technical guidance manual: lakes and reservoirs [M]. Washington D C: US Environmental Protection Agency, 2000.
- [28] Maret T R, Konrad C P, Tranmer A W. Influence of environmental factors on biotic responses to nutrient enrichment in agricultural streams [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, **46**(3): 498-513.
- [29] Xu H, Pearl H W, Qin B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.
- [30] Duan S W, Kaushal S S, Groffman P M, et al. Phosphorus export across an urban to rural gradient in the Chesapeake Bay watershed [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, **117**(G1).
- [31] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. Water Research, 2001, **35**(14): 3462-3472.
- [32] Huang J L, Huang Y L, Zhang Z Y. Coupled effects of natural and anthropogenic controls on seasonal and spatial variations of river water quality during baseflow in a coastal watershed of southeast China [J]. Plos One, 2014, **9**(3): e91528.
- [33] Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes [J]. Freshwater Biology, 2005, **50**(10): 1605-1615.
- [34] Adenan N S, Yusoff F M, Shariff M. Effect of salinity and temperature on the growth of diatoms and green algae [J]. Journal of Fisheries and Aquatic Science, 2013, **8**(2): 397-404.
- [35] de Castro Araújo S, Garcia V M T. Growth and biochemical composition of the diatom *Chaetoceros* cf. *wighamii* brightwell under different temperature, salinity and carbon dioxide levels. I. Protein, carbohydrates and lipids [J]. Aquaculture, 2005, **246**(1-4): 405-412.
- [36] Jia X H, Wu N C, Tang T, et al. Spatiotemporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(4): 881-886.
- [37] Wu S Y, Ge J W, Miao W J, et al. Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(21): 7023-7034.
- [38] Power M E, Stewart A J, Matthews W J. Grazer control of algae in an Ozark mountain stream: effects of short-term exclusion [J]. Ecology, 1988, **69**(6): 1894-1898.
- [39] Tian Y Q, Huang B Q, Yu C C, et al. Dynamics of phytoplankton communities in the Jiangdong Reservoir of Jiulong River, Fujian, South China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, **32**(2): 255-265.
- [40] 朱津永, 张克鑫, 万莉, 等. 一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1309-1316.
- [41] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States [J]. Ecological Indicators, 2007, **7**(1): 48-70.
- [42] Kelly M, Juggins S, Guthrie R, et al. Assessment of ecological status in UK rivers using diatoms [J]. Freshwater Biology, 2008, **53**(2): 403-422.
- [43] Kelly M G, King L, Jones R I, et al. Validation of diatoms as proxies for phyto-benthos when assessing ecological status in lakes [J]. Hydrobiologia, 2008, **610**(1): 125-129.
- [44] Stevenson R J, Pan Y D, Manoylov K M, et al. Development of diatom indicators of ecological conditions for streams of the western US [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2008, **27**(4): 1000-1016.
- [45] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. Limnology, 2001, **2**(1): 45-48.
- [46] Codd G A. Cyanobacterial toxins: occurrence, properties and biological significance [J]. Water Science and Technology, 1995, **32**(4): 149-156.
- [47] Brookes J D, Carey C C. Resilience to blooms [J]. Science, 2011, **334**(6052): 46-47.
- [48] 田永强, 俞超超, 王磊, 等. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子 [J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2559-2565.
- [49] Wu Z S, He H, Cai Y J, et al. Spatial distribution of chlorophyll a and its relationship with the environment during summer in Lake Poyang: a Yangtze-connected lake [J]. Hydrobiologia, 2014, **732**(1): 61-70.
- [50] Hilton J, O'Hare M, Bowes M J, et al. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers [J]. Science of the Total Environment, 2006, **365**(1-3): 66-83.
- [51] Van Nieuwenhuysen E E, Jones J R. Phosphorus chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, **53**(1): 99-105.
- [52] Hartig J H, Wallen D G. Seasonal variation of nutrient limitation in Western Lake Erie [J]. Journal of Great Lakes Research, 1984, **10**(4): 449-460.
- [53] White E, Payne G, Pickmere S, et al. Seasonal variation in nutrient limitation of the algal community in Lake Horowhenua, New Zealand [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1991, **25**(3): 311-316.